Научная статья
УДК 553.2
DOI 10.31084/2619–0087/2025-1-3

МИНЕРАЛОГИЯ РУД НОВО-УЧАЛИНСКОГО МЕДНО-ЦИНКОВО-КОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

И. В. Викентьев[1], А. В. Спирина[1], Е. Э. Тюкова[1,2]

[1] — *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Москва. viken@igem.ru*

https://orcid.org/0000-0001-9133-7562; https://orcid.org/0000-0003-4567-0758

[2] — *Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИЦ РАН), Москва*

Ново-Учалинское колчеданное месторождение — один из главных ныне эксплуатируемых рудных объектов Южного Урала. Оно недавно отрабатывается, но уже стало крупным источником меди и серебра, главным в стране — цинка; попутно извлекается Au, а также множество редких и критических/стратегических элементов (In, Co, Ni, Ga, Ge, Se, Te и др.). В ходе полевых работ авторами из различных участков рудной залежи (лежачий, висячий бок, участки выклинивания, контакт с вмещающими вулканитами, а также зоны контакта с дайками габброидов) была отобрана коллекция образцов. С применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) в рудах впервые установлены сульфосоли серебра, касситерит, высокогаллиевая слюда (типа хлорита) и определена пробность самородного золота. Приводятся результаты анализов примесей в сульфидах локальным методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в сочетании с лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС) для пирита, сфалерита, халькопирита из разных минеральных ассоциаций и образцов, локализованных в различных частях рудной залежи. В статье описаны минеральные ассоциации руд, а также ряд редких минералов, установленных здесь авторами. Обнаружено, что пирит является главным концентратором золота, селена и теллура; концентрация их особенно велика при проявлении локального метаморфизма у мощной дайки габбро. В сфалерите сосредоточены высокие концентрации кадмия и индия, а также заметные — галлия и олова.

Ключевые слова: колчеданные руды, самородное золото, касситерит, высокогаллиевая слюда, ЛА-ИСП-МС

Благодарности: Работа выполнена в рамках базовой темы ИГЕМ РАН FMMN-2024–0013.

Original article

ORE MINERALOGY OF NOVO-UCHALY VOLCANOGENIC MASSIVE SULFIDE (VMS) DEPOSIT (SOUTH URALS)

I. V. Vikentyev[1], A. V. Spirina[1], E. E. Tyukova[1,2]

[1] — *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, Russia. viken@igem.ru*

[2] — *Scientific Geoinformation Center, Russian Academy of Sciences (SGIC RAS), Moscow, Russia*

The Novo-Uchaly VMS is one of the main ore objects currently being developed in the South Urals. It is a major source of copper and silver, the main source of zinc in Russia; along the way, Au is

Для цитирования: *Викентьев И. В., Спирина А. В., Тюкова Е. Э.* Минералогия руд Ново-Учалинского медно-цинково-колчеданного месторождения (Южный Урал) // Геологический вестник. 2025. №1. С. 37–53. DOI: 10.31084/2619-0087/2025-1-3

For citation: Vikentyev I. V., Spirina A. V., Tyukova E. E. (2025) Ore mineralogy of Novo-Uchaly volcanogenic massive sulfide (VMS) deposit (South Urals). *Geologicheskii vestnik*. 2025. No. 1. P. 37–53. DOI: 10.31084/2619-0087/2025-1-3

extracted, as well as a number of rare and critical/strategic metals (In, Co, Ni, Ga, Ge, Se, Te, etc.). During the field work, the authors collected a collection of samples taken from various areas of the ore deposit (recumbent, hanging side, wedging areas — the contact zone with host volcanites and dykes of gabbroids). Silver sulfosalts, cassiterite, and high-gallium mica (such as chlorite) and the fineness of native gold have been identified in ores for the first time using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray spectral microanalysis (XMA). The article describes the mineral associations of ores and new minerals identified by the authors. The results of mass spectrometry with inductively coupled plasma in combination with laser ablation (LA-ICP-MS) for minor elements in pyrite, sphalerite, chalcopyrite from various mineral associations and samples from different parts of the ore deposit are presented. It was found that pyrite is the main concentrator of gold, selenium and tellurium; their concentrations are especially high when local metamorphism occurs as a result of the temperature action of a thick gabbro dyke. Sphalerite contains high concentrations of cadmium and indium, as well as gallium and tin.

Keywords: pyrite ores, native gold, cassiterite, high-gallium mica, LA-ICP-MS.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the basic theme of IGEM RAS FMMN-2024–0013.

Введение

Ново-Учалинское медно-цинково-колчеданное месторождение вмещает крупные запасы руды ~120 млн т, меди — 1.1 млн т (ср. сод. 0.99%) и цинка — 3 млн т (ср. сод. 2.95%). Кроме того, руды месторождения являются важным источником Au — 181 т (ср. сод. 1.7 г/т), Ag — 2912 т (ср. сод. 26 г/т) и ряда редких стратегических металлов (In, Ga, Ge, Se, Te и др.) (Государственный доклад…, 2021). Оно было открыто Межозерной ГРП (Олин Э. О. и др.) в 1986 г.; в 1988–1994 гг. эта партия (Исхаков М. А. Купцов И. Б., Казакова И. Ф. и др.) проводила предварительную разведку месторождения глубокими, 1–2 км, скважинами с дневной поверхности. В это время детальное минералогическое картирование руд, основанное на керновом материале, проводилось геологами-минералогами Института геологии Уфимского научного центра РАН Г. Н. Пшеничным и Н. Г. Рыкус (Пшеничный и др., 1999; Рыкус, 1999; Пшеничный, Рыкус, 2001); документация и опробование скважин проводили также геологи ЦНИГРИ (М. И. Вахрушев, В. С. Требухин, Е. П. Ширай), МГУ (В. С. Шарфман) и ИГЕМ РАН (Викентьев И. В.). При подготовке к отработке силами геологов Учалинского ГОКа шло геологическое и геохимическое доизучение (Пирожок, 2008; Орлов и др., 2009; Пирожок и др., 2009). Параллельно с проведением детализационных геологоразведочных работ в центральной части рудной залежи под руководством и при участии М. П. Орлова, В. К. Семендяева, А. В. Чадченко, И. Б. Галиуллина, В. А. Крылатова и В. А. Сапоговой выполнялись проходка уклона и эксплуатационно-разведочное бурение. С 2019 г. на Ново-Учалинском месторождении началось строительство шахты с попутной добычей руды и постепенным увеличением объема добычи (Государственный доклад …, 2023). Геологическим отрядом ИГЕМ РАН в последние годы проводилось картирование подземных горных выработок и документация скважин подземного эксплуатационного бурения (Спирина и др., 2020; Викентьев, Спирина, 2022), что позволило получить дополнительные каменные материалы.

Геологическое строение месторождения

Ново-Учалинское медно-цинково-колчеданное месторождение локализовано на севере Магнитогорской зоны Урала, которая характеризуется максимальной колчеданоносностью (Bortnikov, Vikentyev, 2013). Большой вклад в изучение вулканизма и колчеданных залежей этой зоны сделал И. Б. Серавкин. Месторождение входит в состав Учалинского рудного района (рис. 1) на севере указанной зоны (Серавкин и др., 1994; Знаменский и др., 1990; Серавкин, 2013). Разрез месторождения слагают вулканиты риолит-базальтовой формации эйфельского возраста D_2e (Серавкин и др., 1992; Маслов, Артюшкова, 2000). Рудная залежь локализована на глубине более 600 м от дневной поверхности; она имеет сложную линзовидную форму (рис. 2) с мощными раздувами и резкими пережимами, что стало ясно уже при отработке (Спирина и др., 2020).

Руды месторождения слагают типичные для колчеданных объектов главные минералы: пирит (содержание в рудах — 70–75 об. %), сфалерит (10–20 об. %) и халькопирит (3–5 об. %); нерудные — кварц, барит и кальцит. Довольно распространен второстепенный минерал руд — Zn-теннантит; чуть реже встречаются галенит и магнетит (табл. 1).

По степени сульфидности руды подразделяются на сплошные и вкрапленные (их доли 90 и 10% всех руд месторождения, соответственно).

В составе вкрапленных руд преобладают гипидиоморфные зерна пирита; редко встречаются мелкие выделения халькопирита и сфалерита. В виду преобладания сплошных руд дальнейшее описание строения и минеральных ассоциаций приводится в основном для них.

Руды характеризуются большим разнообразием текстур и структур, которые детально описаны и классифицированы Г.Н. Пшеничным (Пшеничный и др., 1999). Массивные текстуры руд являются главными для месторождения, на их фоне проявляются элементы других текстур, образуя пятнистую, неяснополосчатую или атакситовую текстуру. Массивные руды чаще развиты в северной и южной частях месторождения, а в разрезе они тяготеют к центральной части рудного тела. Менее распространенные брекчиевидные текстуры преимущественно встречаются в средней части залежи, тяготея в разрезе к ее висячему боку. Брекчиевидное строение руд чаще отмечается на контакте с вмещающими вулканитами, реже — дайками габброидов. Полосчатые руды приурочены к контактам с дайками и к участкам выклинивания рудного тела; в разрезе они могут встречаться в висячем и редко — в лежачем боку. Полосчатость подчеркивается линейным расположением укрупненных агрегатов галенита, магнетита, сфалерита, которые располагаются в виде цепочек (слойков) и имеют эпигенетическую природу, вероятно обусловленную контактовым

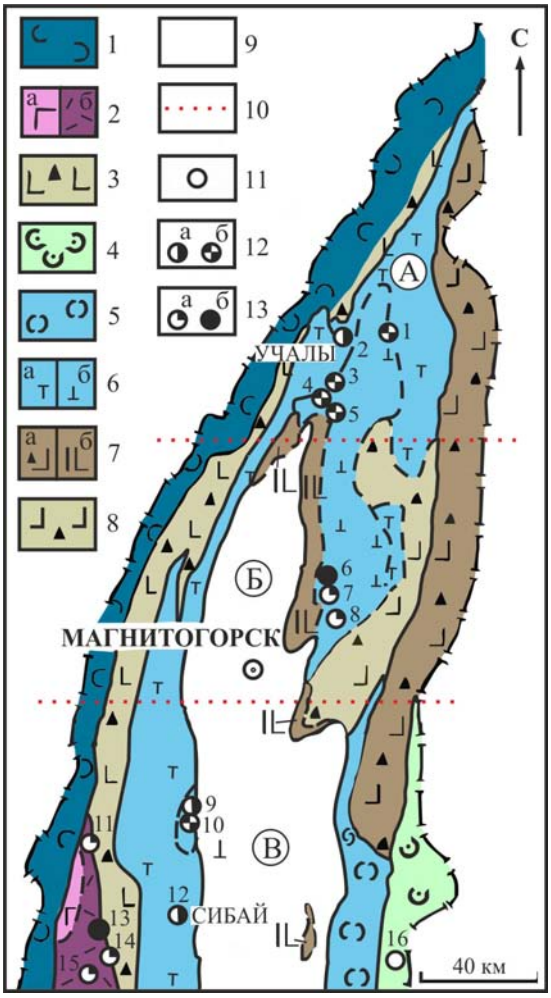

Рис. 1. Схема строения северной части Магнитогорской зоны, по И.Б. Серавкину (2013), с небольшими изменениями

Условные обозначения: 1–7 — формации и комплексы: 1 — зона Главного Уральского разлома, базальтовая (O-S); 2 — базальт-риолитовая (D_1e): контрастный (а) и непрерывный (б) комплексы; 3 — андезито-базальтовая (D_2ef_1) — базальт-андезибазальтовый комплекс ЗМЗ; 4 — базальтовая (D_1e); 5, 6 — базальт-риолитовая (D_2): 5 — базальтовый, 6а — контрастный и 6б — непрерывный комплексы; 7а — андезито-базальтовая (D_2), 7б — базальт-андезито-базальтовая K-Na (D_3f); 8 — базальт-андезит-риолитовая (ВМЗ) — нижнезингейский (D_2ef_1) комплекс; 9 — терригенно-карбонатная и трахибазальтовая (C_1); 10 — зоны широтных дислокаций, разделяющих блоки: А — Учалинский, Б — Магнитогорско-Верхнеуральский, В — Баймакско-Кацбахский; 11–13 — колчеданные месторождения: 11 — цинковые (тип SEDEX); 12 — уральский тип: медно-цинково-колчеданные, Zn>>Cu (а) и медно-цинково-колчеданные с полиметаллической минерализацией (б); 13 — баймакский тип: золото-колчеданно-полиметаллические (а) и золото-колчеданные (б).

Колчеданные месторождения: 1 — Таш-Яр, 2 — Учалинское и Ново-Учалинское, 3 — Озерное, 4 — Узельгинское, 5 — Молодежное, 6 — Сабановское, 7 — Бабарыкинское, 8 — Александринское, 9 — Бакр-Узяк, 10 — Южный Бакр-Узяк, 11 — Тубинская группа, 12 — Сибайское, 13 — Куль-Юрт-тау, 14 — Таналык-Баймакское, 15 — Уваряж, 16 — Амурское.

Fig. 1. Scheme of the structure of the northern part of the Magnitogorsk zone, according to I.B. Seravkin (2013), with minor modifications

Legend: 1–7 — formations and complexes: 1 — zone of the Main Ural Fault, basaltic (O-S); 2 — basalt-rhyolite (D_1e): contrasting (a) and continuous (б) complexes; 3 — andesite-basalt (D_2ef_1) — basalt-andesite-basalt complex of the ZMZ; 4 — basalt (D_1e); 5, 6 — basalt-rhyolite (D_2): 5 — basalt, 6a — contrasting and 6б — continuous complexes; 7a — andesite-basalt (D_2), 7б — basalt-andesite-basalt K-Na (D_3f); 8 — basalt-andesite-rhyolite (VMZ) — lower Singey (D_2ef_1) complex; 9 — terrigenous-carbonate and trachybasalt (C_1); 10 — zones of latitudinal dislocations dividing blocks: A — Uchalinsky, Б — Magnitogorsk-Verkhneuralsky, B — Baimaksko-Katsbakhsky; 11–13 — pyrite deposits: 11 — zinc (SEDEX type); 12 — Ural type: copper-zinc-pyrite, Zn>>Cu (a) and copper-zinc-pyrite with polymetallic mineralization (б); 13 — Baimak type: gold-pyrite-polymetallic (a) and gold-pyrite (б).

Pyrite deposits: 1 — Tash-Yar, 2 — Uchalinskoye and Novo-Uchalinskoye, 3 — Ozernoye, 4 — Uzelginskoye, 5 — Molodeznoye, 6 — Sabanovskoye, 7 — Babarykinskoye, 8 — Aleksandrinskoye, 9 — Bakr-Uzyak, 10 — Southern Bakr-Uzyak, 11 — Tuba group, 12 — Sibayskoye, 13 — Kul-Yurt-tau, 14 — Tanalyk-Baymakskoye, 15 — Uvaryazh, 16 — Amurskoye.

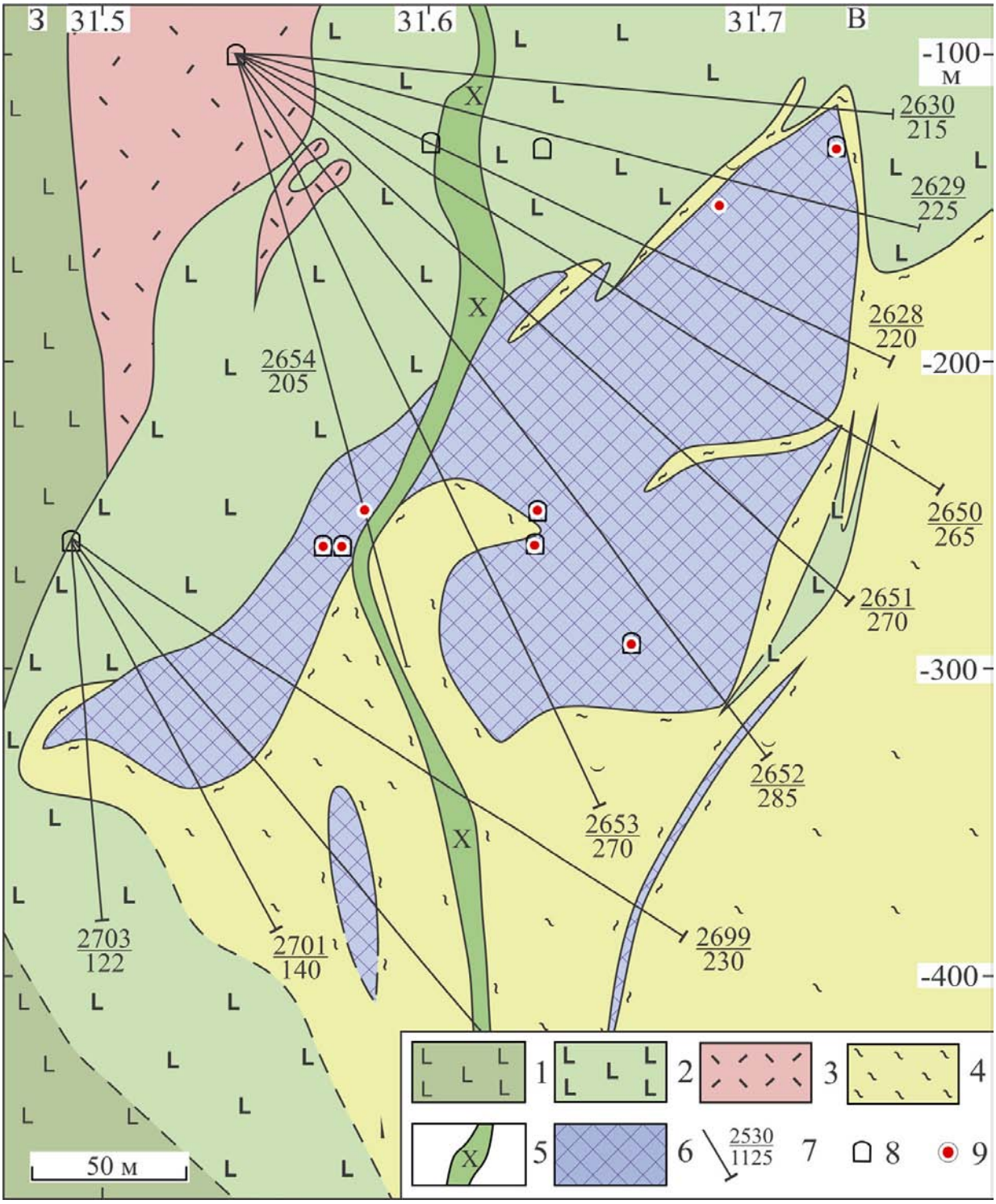

Рис. 2. Поперечный разрез по профилю 28^{+15} в северной части залежи

Учтены данные разведки Межозерной ГРП, Учалинского филиала Башкиргеологии и Учалинского ГОКа
Условные обозначения: 1 — базальты, 2 — долериты, 3 — риодациты, 4 — серицит-кварцевые метасоматиты, 5 — дайка габбро, 6 — рудное тело, 7 — скважина с номером и глубиной, 8 — горные выработки, 9 — точки отбора образцов.

Fig. 2. Cross-section along profile 28^{+15} in the northern part of the deposit

The exploration data of Mezhozernaya GRP, Uchalinsky branch of Bashkirgeologiya and Uchalinsky GOK were taken into account
Legend: 1 — basalts, 2 — dolerites, 3 — rhyodacites, 4 — sericite-quartz metasomatites, 5 — gabbro dike, 6 — ore body, 7 — well with number and depth, 8 — mine workings, 9 — sampling points.

Таблица 1. Минеральный состав руд Ново-Учалинского месторождения (по (Пшеничный и др., 1999) с изменениями)
Table 1. Mineral composition of ores of the Novo-Uchalinskoye deposit (according to (Pshenichny et al., 1999) with changes)

Распространение	Минералы	
	Рудные	Нерудные
Главные	Пирит, сфалерит, халькопирит	Кварц, барит, кальцит
Второстепенные	Блеклая руда, галенит, магнетит	Серицит, хлорит
Редкие и очень редкие	Пирротин, арсенопирит, сульфосоли серебра (полибазит*, пирсеит*), ленаит*, иодирит*, самородное золото, алтаит, теллуровисмутит, гессит, петцит*, колорадоит, бурнонит*, буланжерит*, гематит, борнит, касситерит*, кобальтин(?)	Лейкоксен, аксинит, флюорит, гипс, апатит, алланит*, кимрит*, эпидот, пумпеллиит*, высокогаллиевый хлорит*

Примечание. * — минералы, впервые установленные авторами в рудах данного месторождения.
Notes. * — for the first time established by the authors in the ores of this deposit.

или динамическим метаморфизмом. Локально в висячем боку отмечались порфиробласты пирита, которые состоят из мелкозернистых агрегатов, цементирующихся халькопиритом. На выклинках залежи и вдоль контактов с вмещающими породами, особенно в лежачем боку залежи, сплошные руды приобретают гнейсовидное строение, далее сменяясь вкрапленными рудами в метасоматитах. В участках флексурообразного перегиба в средней части рудного тела часто встречаются текстуры течения.

В целом руды имеют преимущественно кристаллически-зернистое строение с размером зерен от первых микрон до нескольких мм. Различные структуры особенно характерны для пирита: глобули, фрамбоиды, колломорфно-зональные почки, метаколлоидные и криптозернистые агрегаты, зернистые различной размерности. Несколько реже встречаются структуры замещения, распада твердых растворов и различные катакластические структуры. В участках близ контакта с дайками габброидов отмечаются структуры перекристаллизации (порфиробластические, структуры «отжига»).

Материал и методы исследования

В ходе полевых работ авторами были отобраны представительные пробы руды из различных участков залежи (лежачий, висячий бок; верхняя, нижняя выклинки; северная и центральная часть рудного тела; контакт руды с дайкой габбро); опробование проходило в 1991–1993 гг. по скважинам доразведки месторождения и в 2017–2022 гг. по подземным выработкам и эксплуатационно-разведочным скважинам. В результате собрана представительная коллекция, насчитывающая 475 образцов. Микроскопические исследования и аналитические работы выполнены в аншлифах и прозрачно-полированных шлифах, в отдельных случаях — в эпоксидных шашках с монтированными зернами рудных минералов.

Исследование содержаний основных компонентов минералов руд выполнено в ИГЕМ РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе (РСМА) Jeol JXA-8200, оснащенном пятью волновыми и одним энергодисперсионным спектрометрами; элементы определялись при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе на цилиндре Фарадея 20 нА, диаметре пучка 1 мкм (аналитики Е. В. Ковальчук, Н. В. Трубкин), а также на сканирующем микроскопе JSM-5610, оснащенном системой энергодисперсионного микроанализа INCA-450 и спектрометром AztecOne (аналитики Л. О. Магазина, Л. А. Левицкая, А. В. Мохов, ИГЕМ РАН; Д. А. Варламов, ИЭМ РАН); изображения получены в режиме обратно рассеянных электронов (BSE). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток на цилиндре Фарадея 20 нА, диаметр пучка 1 мкм. Время экспозиции на все элементы составляло 10 с на пике и по 5 с на фоне с обеих сторон. В качестве эталонов использованы Sb_2S_3, CdSe, ZnS, HgS, $CuFeS_2$, $AgSbS_2$, Bi_2Te_3, GaAs, PbS и химически чистые металлы. Аналитические линии: для элементов Zn, S, Cu, Fe, Ni, Co — Kα; для Ag, As, Te, Sb, Se, Pd, Pt — La; для Hg, Bi, Pb — Mα, для Cd — Lβ. При анализе силикатов

в качестве стандартов на определяемые элементы использовались соединения, близкие по составу к исследуемым фазам. Расчет поправок осуществлялся по методу ZAF-коррекции с использованием программы фирмы JEOL. С применением сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) были диагностированы редкие минералы (первые мкм), установлена пробность самородного золота. Методом РСМА был изучен состав сульфосолей серебра и химический состав сульфидов (30 образцов, 150 минерало-определений).

Изучение микропримесей в минералах (300 профилей и точек) выполнено с помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и лазерным пробоотбором LA-ICP-MS (квадрупольный масс-спектрометр ThermoXSeries^2 с системой лазерного пробоотбора NewWave UP213) в центре коллективного пользования «ИГЕМ-Аналитика» в ИГЕМ РАН (аналитик В. Д. Абрамова) (Викентьев и др., 2016). Для анализа использовались коммерческий сульфидный стандарт USGS mass-1 (Wilson et al., 2002) и сульфидный стандарт в пирротиновой матрице (по 20 ppm[1] ЭПГ, золота и серебра), синтезированный в ИГЕМ РАН по методу (Ballhaus et al., 2006) и аттестованный в нескольких независимых лабораториях. Вскрытие зерен сульфидов осуществлялось с помощью точечной и профильной (бороздовой) абляции; диаметр луча лазера 60 μm, частота 10 Гц, энергия на поверхности образца 7–8 Дж/см^2. Длина аналитического профиля составляла 200–300 мкм, пройденного лучом лазера за 1.5–2 мин (скорость прожига по линии — 5 мкм/с). Абляция начиналась после 30 с измерения фона.

По каждому профилю получается много десятков анализов химического состава минералов — по макрокомпонентам (оценочно) и микропримесям (основная задача данного метода); предел чувствительности для большинства элементов составлял 0.02–0.05 ppm. Помимо таблиц с результатами при анализе получаются графики (зачастую называемые «спектрами распределения»), представляющие собой временные развертки, на которых видно количество импульсов каждого элемента, подсчитанных масс-спектрометром в поступающей в него из камеры лазерного пробоотбора плазме. Развертки удобны для наглядного представления уровня содержания и равномерности распределения примесных компонентов. Для сопоставлений обычно выбираются участки без включений (без «пиковых» значений), отдельные для каждого минерала, данные по которым усредняются. Расчет данных был проведен в приложении Iolite для программы Igor Pro (Paton et al., 2011).

Минеральные ассоциации

На основе проведенных минералогических исследований и с учетом результатов предшественников, нами выделены следующие минеральные ассоциации: кальцит-кварц-пиритовая (кварц, кальцит, барит ± сфалерит, халькопирит), халькопирит-пиритовая (± сфалерит, блеклая руда, галенит), сфалерит-халькопирит-пиритовая, сфалерит-пиритовая, пирит-барит-сфалеритовая и жильная полисульфидная.

Кальцит-кварц-пиритовая минеральная ассоциация представлена преимущественно агрегатами пирита с признаками метаколлоидного и колломорфного строения, цементирующегося кальцитом, кварцем и баритом. Упомянутые образования встречаются в локальных участках в виде реликтов. К ним относятся глобули и фрамбоиды пирита, которые содержат микровключения и нередко цементируются агрегатами галенита; почки концентрически-зонального строения, сложенные пиритом, сфалеритом и теннантитом, изредка встречаются мелкие выделения тетраэдрита. Нередко в агрегатах пирита наблюдались субмикронные выделения кобальтовых минералов, которые подчеркивают зональность в пирите. В рамках данной минеральной ассоциации можно видеть несколько морфологических разновидностей пирита: «пористый» (криптозернистый, размером сотые доли мм), радиально-лучистый и кристаллически-зернистый (0.01–0.2 мм), цементирующиеся выделениями халькопирита, сфалерита, реже Zn-теннантита и галенита. Данная минеральная ассоциация слагает существенно ранние «протопиритовые» руды.

Халькопирит-пиритовая ассоциация слагает медистые руды и представлена крупнозернистыми агрегатами пирита размером 0.5–2 мм, которые цементируются халькопиритом, образующим микропрожилки и гнезда (от десятых долей до первых мм). Иногда количественно халькопирит преобладает над пиритом и замещает его. Халькопирит-пиритовые агрегаты образуют различной формы пятна, полосовидные и прожилковидные выде-

[1] Во всех случаях в тексте для обозначения концентраций микроэлементов в валовых пробах руд и пород приняты единицы г/т, а при рассмотрении содержаний примесей, получаемых при микроанализе зерен минералов — ppm

ления среди мелкозернистого пирита кальцит-кварц-пиритовой ассоциации. Иногда этот пирит имеет зональное строение от 1–2 до 10 зон роста. Часть крупных гнезд халькопирита содержит мелкие включения (сотые реже десятые доли мм) теннантита, галенита, реже сфалерита. Изредка в ассоциации с халькопиритом отмечаются гнезда сфалерита, теннантита и галенита размером 0.1–0.3 мм и их прожилки.

Халькопирит-сфалерит-пиритовая ассоциация представлена среднезернистым пиритом (0.1–0.5 мм), в его интерстициях отмечаются гнезда и прожилки халькопирита и сфалерита размером от 0.1 до 0.3–0.5 мм. В ассоциации с халькопиритом и сфалеритом встречаются выделения (0.01–0.1 мм) теннантита и галенита. В виде включений в пирите этой ассоциации выявлены теллуриды (алтаит, гессит) размером первые мкм. Халькопирит-сфалерит-пиритовая ассоциация является переходной между халькопирит-пиритовой и сфалерит-пиритовой и слагает медно-цинково-колчеданные руды.

Сфалерит-пиритовая и *пирит-барит-сфалеритовая* минеральные ассоциации представлены мелкозернистыми (зерна в сотые доли мм) гипидиоморфными выделениями пирита в ассоциации с обильным, а то и преобладающим сфалеритом. Крупные (до первых мм) агрегаты сфалерита содержат включения магнетита, теннантита, галенита и хлорита, реже халькопирита. Благодаря высокой пластичности сфалерита и галенита, эти руды нередко имеют полосчатое строение с элементами гнейсовидности и текстур течения. Эти минеральные ассоциации тяготеют к мощному раздуву рудного тела в его средней части. Пирит образует в сфалерите рассредоточенную вкрапленность, сростки нескольких зерен, небольшие зернистые агрегаты. В полосчатых рудах вкрапленники пирита сгруппированы, образуя цепочечные выделения. Количество пирита в сфалерите составляет от единичных зерен до густой вкрапленности. Отдельные более крупные вкрапленники пирита содержат мелкие (тыс. доли мм) включения сфалерита. В сплошной сфалеритовой руде (на контакте с дайкой габбро) с линзовидными скоплениями перекристаллизованного пирита встречено самородное золото (пробностью от 610–640 до 724–735), образующее множество ксеноморфных выделений размером 5–10 мкм. Кроме того, в пирите обнаружены мелкие гнезда и прожилки галенита и халькопирита с выделениями самородного золота, реже оно находится в ассоциации с теннантитом и галенитом, а изредка и с халькопиритом.

В пределах рудной залежи встречаются участки, где количество сфалерита резко преобладает над концентрациями пирита; руды таких участков характеризуются сливной текстурой. Здесь резко повышаются содержания барита, теннантита и галенита, образуя пирит-барит-сфалеритовую минеральную ассоциацию. Минеральный состав включений в сфалерите аналогичен выше описанному сфалериту: магнетит, хлорит, теннантит, галенит. Кроме того, в сфалерите из этих двух минеральных ассоциаций нередко устанавливаются мелкие агрегаты *касситерита,* размером 2–5 мкм. Методом СЭМ в низкотемпературном сфалерите, приуроченном к средней части залежи, установлены удлиненные зерна (20–50 мкм) силиката типа слюды или Fe-хлорита с присутствием в качестве макрокомпонента галлия (от 1 до 10 мас. %) и примесью германия (0.12 до 1 мас. %). В некоторых агрегатах их концентрации возрастают – Ga_2O_3 до 30 мас. %, GeO_2 до 6 мас. %; судя по соотношениям концентраций (их попарной антикорреляции) Ga и Ge изоморфно замещают, соответственно, Al и Mg. В точках анализа с максимально высокими содержаниями Ga_2O_3 (>20 мас. %) в этом силикате резко понижаются концентрации Al_2O_3, составляя менее 1 мас. % (Варламов и др., 2021; Спирина и др., 2023).

Жильную полисульфидную ассоциацию представляют: а) кварц-баритовые жилы с крупными (2–3 мм) агрегатами халькопирита (± магнетит) и теннантита (иногда в отсутствии жильных минералов); б) прожилки кварц-кальцитового состава с галенитом и сфалеритовом (±теннантит, халькопирит), мощностью до 1 см, это т. н. альпийские прожилки, встречаются довольно редко. Указанные прожилки образуются в локальных участках повышенной трещиноватости руды, обычно тяготеют к зонам контакта руды с дайкой габбро, реже с вмещающими вулканитами. Обычно они относятся к числу самых поздних рудных образований. В северной части залежи в верхнем ее выклинивании на контакте с вмещающими долеритами в прожилке карбонат-кварцевого состава обнаружены агрегаты пирита с симплектитами галенита и блеклой руды (Vikentyev et al., 2021). В оптическом микроскопе выявленные блеклые руды не отличались между собой в виду мелких размеров агрегатов (первые мкм). Методом РСМА установлено, что часть выделений блеклой руды имеет высокие содержания серебра (от 6 до 38 мас. %), эти сульфосоли с высокими содержаниями

Ag (> 6 мас. %) по химическому составу соответствуют пирсеиту и полибазиту.

Элементы-примеси в сульфидах

Для изучения характера распределения элементов-примесей в главных сульфидах руд — пирите, сфалерите и халькопирите выделенных минеральных ассоциаций и отобранных из различных участков залежи (контакт с вмещающими породами, дайками, верхний и нижние горизонты, лежачий и висячий бок) был применен метод ЛА-ИСП-МС анализа. Сначала рассмотрим особенности распределения микропримесей в ***пирите*** разной морфологии (рис. 3–6).

Несмотря на довольно заметный динамометаморфизм руд и их преобладающую массивную текстуру, в них зачастую сохраняются почки пирита концентрически-зонального строения (рис. 3) с мелкими гнездами сфалерита в тонком срастании с халькопиритом и выделениями галенита. Наблюдается зональное распределение элементов-примесей с их преимущественным накоплением по отдельным зонам и заметной вариацией концентраций: Cu = 0.03–0.4 мас. %, As = 0.12 мас. %, Ni = 80–108 ppm, Ag = 24–32 ppm, Sn = 16.5–155 ppm, In = 1–5 ppm, Au = 2.5–3.1 ppm, Tl = 6.6–14.3 ppm, Bi = 1–6 ppm. Максимальные из коэффициентов корреляции (от больших к меньшим) установлены для таких элементов: Pb — Bi = 0.97; Zn — Cd = 0.96, Zn — In = 0.95; Fe — As = 0.94; Fe — Ni = 0.93; As — Ag = 0.92; As — Ni = 0.9; Fe — Ag = 0.85; Ag — Ni = 0.85; Fe — Sn = 0.76; Ag — Sn = 0.74; As — Tl = 0.73; Fe — Tl = 0.71; Pb — Tl = 0.71; Ag — Sb = 0.69; Zn — Sn = 0.67; Ag — Au = 0.66; Ag — Tl = 0.65.

Также нередко встречается тонкозернистый (метаглобулярный) пирит с мелкими агрегатами халькопирита и сфалерита в ассоциации с крупными гнездами халькопирита (рис. 4а). В пирите установлены примеси Ni (46.5 ppm), Se (29.5 ppm), Pb (1.9 мас. %), Tl (7.7–13.5 ppm), Au (4.9 ppm), As (0.15 мас. %), Sb (102–336 ppm), Ag (26.7–46.9 ppm), Mn (930 ppm). Распределение примесей в пирите имеет слабо выраженный зональный характер. В гнезде халькопирита присутствует примесь In (до 115 ppm) и Sn (до 200 ppm), в пограничной зоне — примесь Cd (1417 ppm) и Ga (46 ppm). На профиле (рис. 4б) отчетливо прослеживается преимущественная концентрация In в халькопирите, Cd — в микроагрегате сфалерита в пирите, а Ag равномерно распределено в мелкозернистом пирите. Коэффициенты корреляции примесей: Zn — Cd = 0.98, Cu — In = 0.92, Ag — As = 0.9,

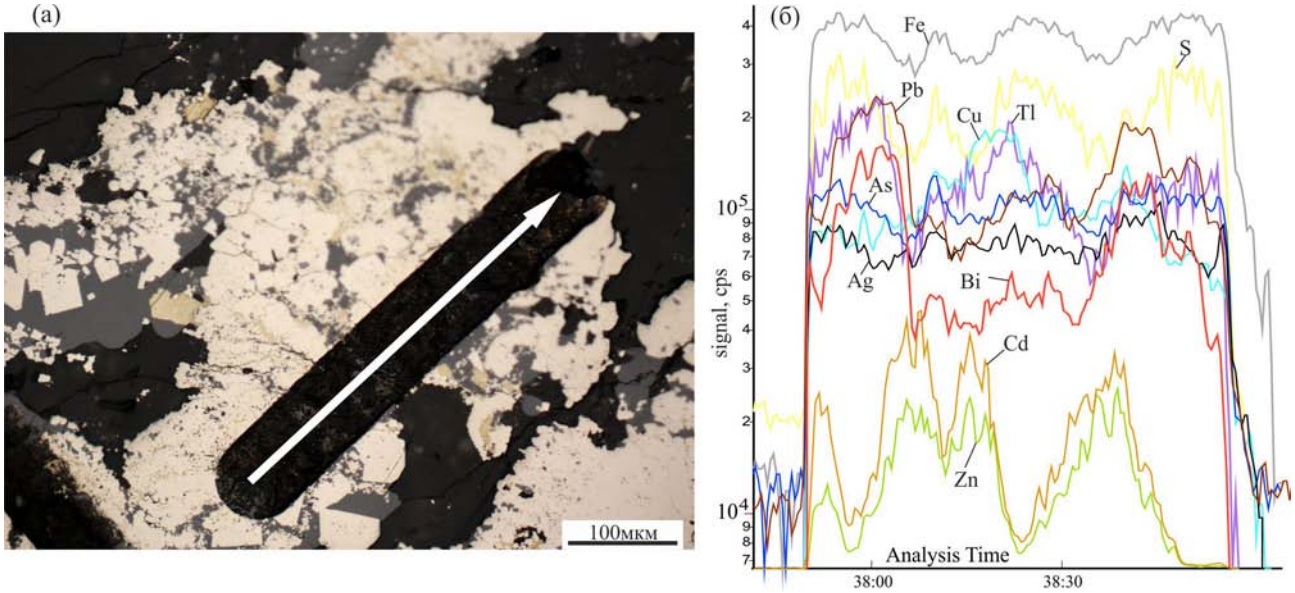

Рис. 3. Распределение элементов-примесей в почке пирита с зональным развитием галенита, сфалерита и халькопирита (обр. 2531-I/960.3)

Условные обозначения: (а) — профиль прожига почки на микрофотографии; (б) — графики распределения Fe, S и элементов-примесей.

Fig. 3. Distribution of trace elements in a pyrite kidney with zonal development of galena, sphalerite and chalcopyrite (sample 2531-I/960.3)

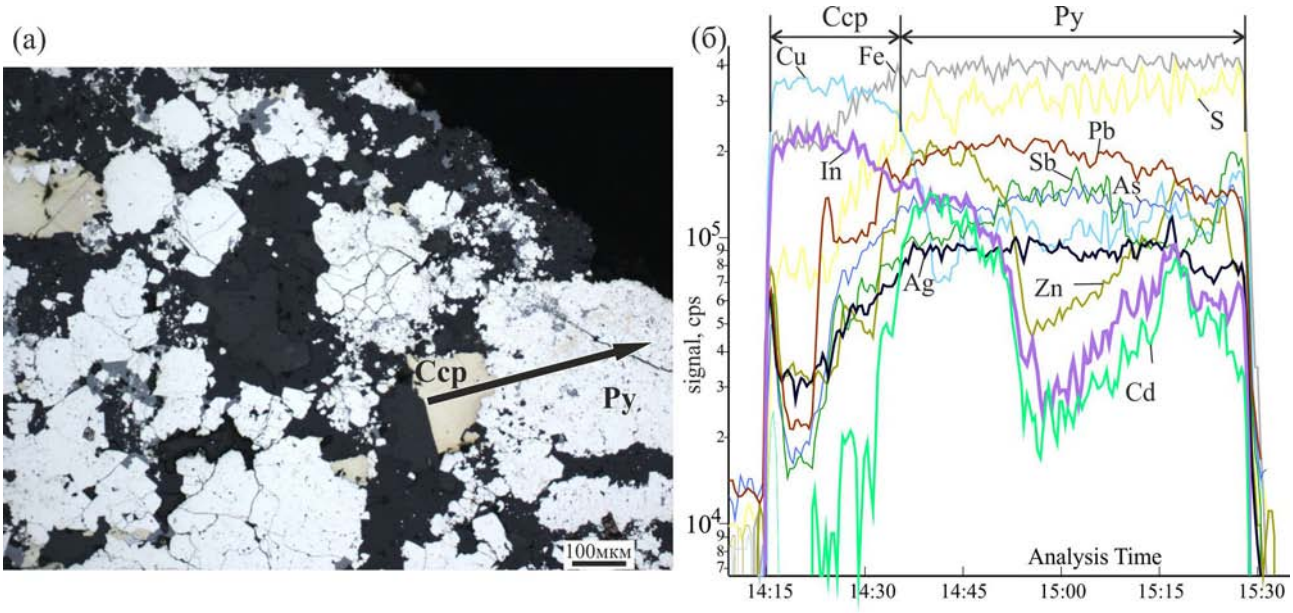

Рис. 4. Распределение элементов-примесей в срастании халькопирита и мелкозернистого (метаглобулярного) пирита (обр. 2531/1037.5)

Условные обозначения: (а) — положение профиля абляции на микрофотографии, (б) — графики распределения Fe, S и элементов-примесей в образце.

Аббревиатуры минералов (здесь и ниже): Py — пирит, Ccp — халькопирит, Sp — сфалерит, Gn — галенит.

Fig. 4. Distribution of trace elements in the intergrowth of chalcopyrite and fine-grained (metaglobular) pyrite (sample 2531/1037.5)

Legend: (a) — position of ablation profile on micrograph, (б) — graphs of the distribution of Fe, S and trace elements in the sample.

Mineral abbreviations (here and below): Py — pyrite, Ccp — chalcopyrite, Sp — sphalerite, Gn — galena.

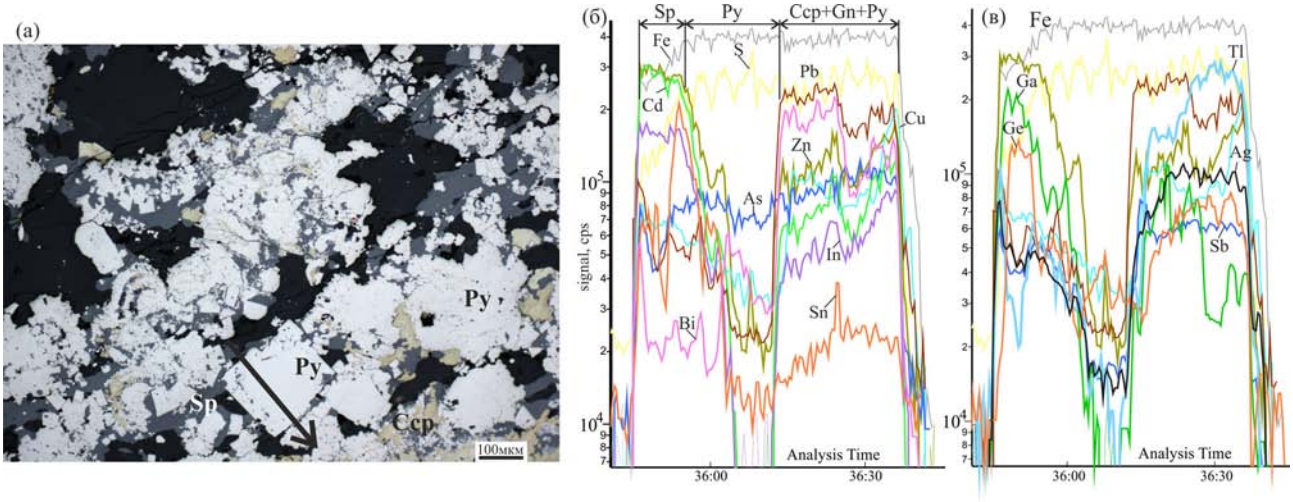

Рис. 5. Распределение Fe, S, Cu, Zn и элементов-примесей в срастании сфалерита, пирита и мелкокристаллического агрегата сульфидов (обр. 2531–1/960.3)

Условные обозначения: (а) — положение аналитического профиля, последовательно пересекающего сфалерит, кристалл пирита и агрегата пирит+халькопирит+галенит; (б) и (в) — концентрационные линии элементов, дополняющие друг друга.

Fig. 5. Distribution of Fe, S, Cu, Zn and trace elements in the intergrowth of sphalerite, pyrite and fine-crystalline sulfide aggregate (sample 2531–1/960.3)

Legend: (a) — position of the analytical profile successively intersecting sphalerite, pyrite crystal and pyrite+chalcopyrite+galena aggregate; (б) and (в) — concentration lines of elements complementing each other.

Cu — Sn = 0.89, Au — Ag = 0.83, Ag — Tl = 0.81, Ag — Se = 0.8, Tl — As = 0.8, Tl — Au = 0.76, Au — As = 0.75.

Кристаллический пирит сплошных халькопирит-сфалерит-пиритовых руд характеризуется резко пониженными концентрациями элементов-примесей (рис. 5). Профиль лазерного микроанализа пересекает зону сфалерита, далее кристаллического пирита и «пористого» (тонкозернистого) агрегата пирита, цементирующегося халькопиритом. В сфалерите отмечается небольшое повышение содержаний Cd и In, а на границе с кристаллом пирита возрастает примесь Sn и Te (до 40–78.5 ppm). Коэффициенты корреляции Zn — Cd = 0.98; Zn — In = 0.92; Sn — Te = 0.99. Далее в кристалле пирита уровень содержаний элементов-примесей падает и вновь возрастает на границе и в «пористом» пирите. Содержания Ag = 47–52.3 ppm, Au = 2–9.6 ppm, Tl = 0–22.4 ppm, Sb = 0.6–33.4 ppm, Bi = 0–24 ppm, Ni = 1–90 ppm, мышьяк распределен относительно равномерно по фазам и составляет 0.1–0.15 мас. %. Co — не обнаружен. Коэффициенты корреляции As — Ag = 0.85, As — Tl = 0.83, Au — Ag = 0.73, Au — Tl = 0.72, Ag — Sb = 0.8.

Пирит из густовкрапленной полисульфидной руды (халькопирит, сфалерит, галенит) с контакта с дайкой габбро характеризуется своеобразными набором и концентрациями элементов-примесей (рис. 6). Профиль проходит через срастание пирит-галенит: анализ показал, что в галените содержатся повышенные содержания Sb (168 ppm), Se (2187 ppm), Bi (259 ppm); на границе пирит-галенит содержатся повышенные содержания Au (2.83–453.9 ppm), Te (15.4–1153 ppm), Ag (89.2–1602 ppm), причем в галените согласованные пики демонстрируют Ag и Te, а в пирите проявлены пики Ag — Au — Te и также Ag — Te, что вероятно отражает присутствие субмикроскопических включений теллуридов (вероятно петцита и гессита). В пирите средние содержания As = 480 ppm, Mn = 466 ppm, и незначительно повышены содержания Co (до 110 ppm) и Sn (2–35 ppm). Коэффициенты корреляции составляют: Pb — Se = 0.98, Pb — Sb = 0.98, Pb — Bi = 0.85, Ag — Te = 0.98, As — Fe = 0.86, As — Co = 0.78, Mn — Fe = 0.78.

На примере вышеприведенных графиков и данных табл. 2 отмечается зональное распределение As в кристаллических агрегатах пирита, слагающего основные объемы вкрапленных и сплошных руд пирит-барит-сфалеритовой и подчиненной халькопирит-пиритовой минеральных ассоциаций. В пирите первой из этих ассоциаций со сфалеритом содержания As в пирите уменьшаются по сравнению с другими ассоциациями; вероятно, это связано с кристаллизацией крупных выделений блеклой руды и соответственно перераспределением мышьяка с его преимущественным вхождением в состав теннантита. Свинец отмечается в составе пирита всех минеральных ассоциаций, что отвечает почти повсеместному присутствию в рудах мелких выделений галенита. Au и Ag распределены в пирите всех ассоциаций практически равномерно, но в ассоциациях с блеклой рудой обычно отмечаются повышенные содержания серебра (в пирите C_{Ag} до 160 ppm, более обычны 10–20 ppm). Кадмий повышен в минеральных ассоциациях с существенной долей сфалерита (в пирите C_{Cd} до 175 ppm, но обычно до 10 ppm), остальные элементы-примеси имеют схожий порядок содержаний в различных ассоциациях. В пирите близ контакта с дайкой габбро увеличиваются содержания золота, теллура, серебра (см. рис. 6). В целом, содержания элементов-примесей в пирите из разных участков залежи не сильно отличаются; локально бывают чуть повышены значения серебра, олова, свинца (табл. 3).

Сфалерит — главный концентратор индия (33–115 ppm), кадмия (1362–1791 ppm), олова (6–259 ppm) и ртути (140–214 ppm), табл. 3. На контакте руды с дайкой габбро, увеличиваются содержания In — 113 ppm, Sn — 259 ppm, Hg — 214 ppm, Mn — 123 ppm. В частных случаях, как на рис. 7, в сфалерите из образца тонкозернистой сфалерит-пиритовой руды, отобранном в 0.9 м от контакта с мощной дайкой габбро, установлены самые высокие содержания (в ppm) индия — 457, кадмия — 1505, Hg — 260, Ga — 88 и Ag — 26. На графике (рис. 7б) видно, что индий, кадмий и ртуть распределены равномерно, а галлий неравномерно.

В табл. 4 приведены содержания элементов-примесей в сфалерите разных минеральных ассоциаций. В сфалеритах пирит-барит-сфалеритовой ассоциации отмечаются максимальные значения кадмия и индия, также повышены содержания серебра (вероятно, ввиду сосуществующих сфалерита и блеклой руды) и галлия (в таком сфалерите установлены включения высокогаллиевой слюды).

Халькопирит (см. табл. 3) — второй после сфалерита концентратор индия (14–30 ppm); в нем отмечаются довольно высокие содержания олова (7–24 ppm), серебра (6–29 ppm). Цинк (78–282 ppm) и свинец (3–53 ppm) — постоянные примеси в халькопирите любой ассоциации, особенно в тех, где много сфалерита (табл. 5). В халькопирите в ассоциации с преобладанием сфалерита установлены

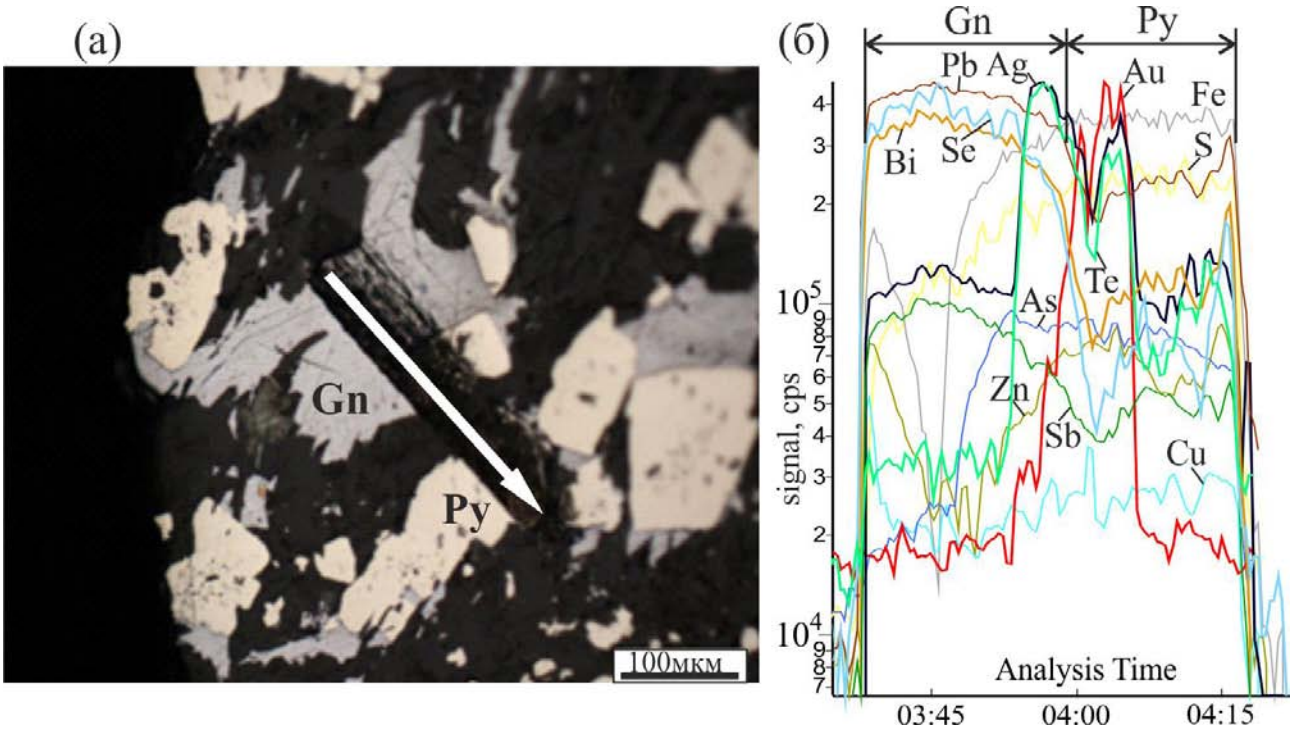

Рис. 6. Распределение элементов-примесей в срастании галенит+пирит

Условные обозначения: (а) — микросрастание галенит+пирит с профилем прожига; (б) — распределение Fe, S, Pb и элементов-примесей в срастании галенит+пирит (обр. 2536/1412.8).

Fig. 6. Distribution of trace elements in the galena+pyrite intergrowth

Legend: (a) — galena+pyrite microintergrowth with a burn profile; (б) — distribution of Fe, S, Pb and trace elements in the galena+pyrite intergrowth (sample 2536/1412.8).

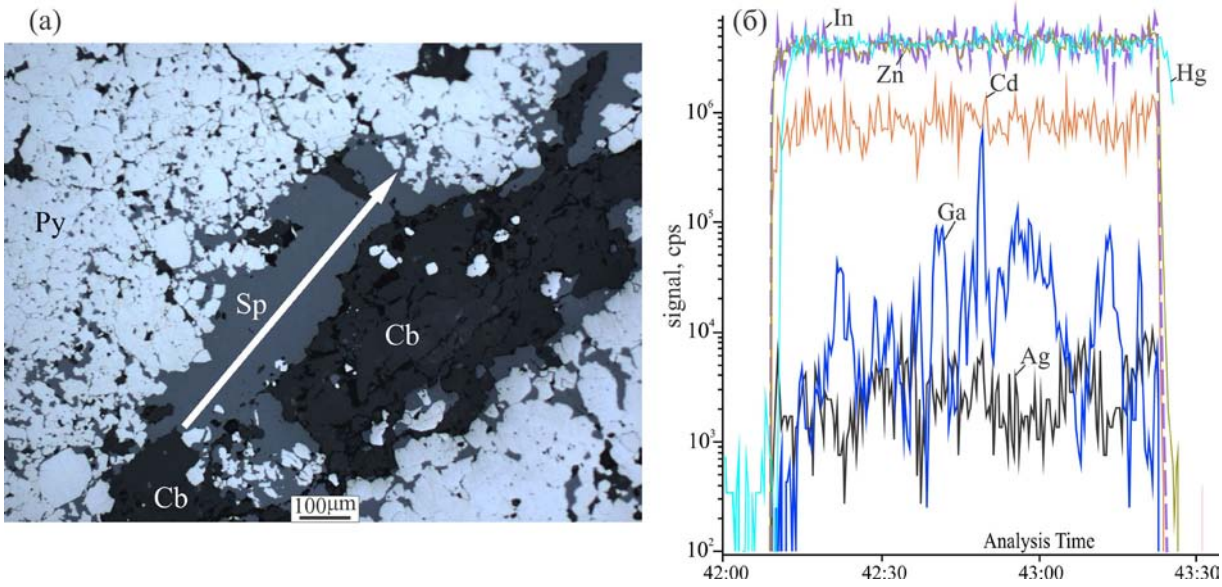

Рис. 7. Распределение элементов-примесей в сфалерите сфалерит-пиритовой руды

Условные обозначения: (а) — микрофото тонкозернистая сфалерит-пиритовая руда (обр. 2681/138), (б) — зональность в распределении In, Cd и др. элементов-примесей.

Fig. 7. Distribution of trace elements in sphalerite of sphalerite-pyrite ore

Legends: (a) — microphoto of fine-grained sphalerite-pyrite ore (sample 2681/138), (б) — zoning in the distribution of In, Cd and other trace elements.

Таблица 2. Средние геометрические содержания элементов-примесей (ppm) в пирите разных минеральных ассоциаций
Table 2. Geometric mean contents of trace elements (ppm) in pyrite of different mineral associations

Элемент	Кальцит-кварц-пиритовая (N = 140)	Халькопирит-пиритовая (N = 39)	Халькопирит-сфалерит-пиритовая (N = 115)	Сфалерит-пиритовая (N = 121)	Пирит-барит-сфалеритовая (N = 9)
Au	1.92	1.01	1.11	1.39	1.65
Ag	8.6	6.2	13.2	15.4	5.7
Co	6*	24	19	11	32
Ni	22	11	21	30	—
As	1027	1040	909	682	465
Sb	25	9	12	18	51
Se	28	33	41	23	50
Te	14	29	18	30	11
Bi	0.86	1.7	3.2	2.7	0.84
Tl	1.98	0.76	0.94	1.46	2.9
Cd	8	2	19	28	44
In	1.4	0.86	1.9	1.4	0.9
Sn	4.7	1	5.7	6.6	4.9
Ga	3.4	1.3	4.2	3.3	9.4
Mn	153	44	69	213	656
Hg	3.8	3.9	5	9.3	9.2
Pb	215	63	257	376	30

Примечания. * изредка до 1000-1700 ppm; N — количество профилей и точек, прочерк (здесь и в табл. 3–5) — ниже предела обнаружения.
Notes. * up to 1000-1700 ppm sometimes; N — number of profiles and points, dash (here and in Tables 3–5) — below the detection limit.

Таблица 3. Среднее геометрическое содержание элементов-примесей (ppm) в главных сульфидах руд Ново-Учалинского месторождения
Table 3. Average geometric content of trace elements (ppm) in the main sulfides of the Novo-Uchalinskoye deposit ores

Тип руды	Минерал	Au	Ag	Cd	In	Ga	Sn	Pb	Hg	Mn
Сплошная руда	Пирит (n = 240)	1.9	10.8	15.7	1.5	3.4	4.8	254	5.3	161
	Сфалерит (n = 17)	0.2	7	1468	75	4.6	6	24	140	65
	Халькопирит (n = 21)	0.12	6	1.9	25	3.4	24	5	8	31
С контакта с дайкой габбро	Пирит (n = 74)	1.5	13.7	13.9	1.6	2.7	6.5	257	6.8	77
	Сфалерит (n = 19)	0.2	15	1791	113	18	259	38	214	123
	Халькопирит (n = 9)	0.5	29	8.1	14	14.7	15	21	20	26
С контакта с вмещающими вулканитами	Пирит (n = 19)	1.1	14.1	40.5	1.2	6.2	3.2	166	8.2	266
	Сфалерит (n = 9)	0.3	8.5	1362	33	32	133	20	145	69
	Халькопирит (n = 8)	—	10	—	30	1.1	7	22	—	6.8

Примечание. Проанализированы 71 образец с пиритом, 68 — со сфалеритом, 17 — с халькопиритом. n — количество профилей и точек.
Note. 71 samples with pyrite, 68 with sphalerite, 17 with chalcopyrite were analyzed. n — number of profiles and points.

Таблица 4. Средние геометрические содержания элементов-примесей (ppm) в сфалерите разных минеральных ассоциаций
Table 4. Geometric mean contents of trace elements (ppm) in sphalerite of different mineral associations

Элементы	Минеральные ассоциации					
	Кальцит-кварц-пиритовая (n = 13)	Халькопирит-пиритовая (n = 5)	Халькопирит-сфалерит-пиритовая (n = 5)	Сфалерит-пиритовая (n = 36)	Пирит-барит-сфалеритовая (n = 4)	Жильная (n = 5)
Cd	1462	1118	1480	1728	2293	1692
In	66	80	113	77	221	99
Pb	56	4	11	33	24	47
Sn	116	—	12	32	14	9
Ba	—	—	1.3	33	—	2.6
Au	0.21	—	0.18	0.36	0.11	—
Ag	8.6	2.5	7.1	14.9	21	15.3
Ga	12.8	0.97	6.4	17.2	60	11
Mn	60	43	66	89	161	138
Hg	117	228	160	158	157	316

Примечание. n — кол-во профилей и точек.
Note. n — number of profiles and points.

Таблица 5. Средние геометрические содержания элементов-примесей (ppm) в халькопирите разных минеральных ассоциаций
Table 5. Geometric mean contents of trace elements (ppm) in chalcopyrite of different mineral associations

Элементы	Минеральные ассоциации				
	Кальцит-кварц-пиритовая (n = 3)	Халькопирит-пиритовая (n = 11)	Халькопирит-сфалерит-пиритовая (n = 16)	Сфалерит-пиритовая (n = 5)	Жильная (n = 3)
Zn	78	180	185	282	156
Pb	22	3	14	53	15
In	30	30	12	47	30
Cd	—	2	3.3	77	—
Ga	1.1	4.1	5.8	2.2	11.7
Hg	—	12	17	11	—
Sn	7.4	26	17	7.5	26
Ag	10	6.4	9.9	12	10
Mn	7	13	22	20	106
Tl	0.30	1.46	0.13	0.16	0.10
Au	—	0.18	—	—	0.22

Примечание. n — кол-во профилей и точек.
Note. n — number of profiles and points.

высокие концентрации кадмия (77 ppm) и индия (47 ppm), чуть повышена C_{Ag} (12 ppm). В халькопирите халькопирит-пиритовой ассоциации максимальны C_{Sn} = 26 ppm и C_{Tl} = 1.46 ppm. В жильном халькопирите повышены концентрации галлия — 11.7 ppm, олова — 26 ppm и марганца — 106 ppm. В халькопирите колчеданно-полиметаллической руды (рис. 8) из участка изгиба рудного тела в средней части месторождения максимумы концентрации индия составляют 172 ppm, олова — 46 ppm, серебра — 7 ppm, а галлия всего — 4.3 ppm, отмечаются небольшие пики цинка (до 24 ppm), вероятно, соответствующие микровключениям сфалерита.

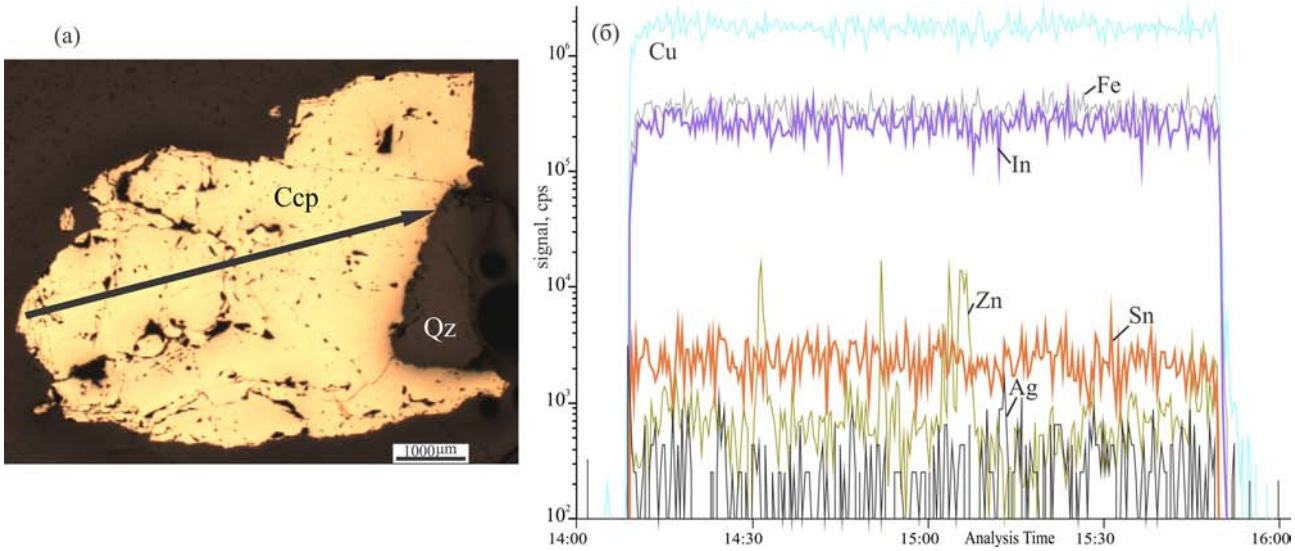

Рис. 8. Вариации в распределении микропримесей In, Sn, Zn, Ag и Ga в халькопирите жильной полисульфидной ассоциации (обр. 2726/143)

Условные обозначения: (а) — жильный халькопирит полисульфидной руды, (б) — относительно равномерное распределение индия, серебра и олова.

Fig. 8. Variations in the distribution of trace elements In, Sn, Zn, Ag and Ga in chalcopyrite of the vein polysulfide association (sample 2726/143)

Legend: (a) — vein chalcopyrite of polysulfide ore, (б) — relatively uniform distribution of indium, silver and tin.

Выводы

На основе приведенных результатов можно сделать следующие выводы:

Впервые в рудах Новоучалинского месторождения установлены редкие Ag-сульфосоли, касситерит, высокогаллиевая Fe-слюда, ленаит, иодирит, бурнонит, буланжерит, петцит, алланит, кимрит, пумпеллиит.

Для сплошных руд характерна преимущественно массивная текстура; брекчиевидные, полосчатые руды локализованы в зонах выклинивания рудной залежи и участках близ контакта с мощной дайкой габбро.

Глобулярный, тонкозернистый пирит кальцит-кварц-пиритовой ассоциации характеризуется зональным распределением мышьяка и довольно высокими его содержаниями. По мере эволюции состава минеральных ассоциаций, содержания примесей в пирите уменьшаются, что связано с кристаллизацией блеклой руды, галенита и других редких минералов куда входят многие из них. Пирит является главным концентратором золота, мышьяка, селена и теллура. В пирите близ контакта с дайкой габбро увеличиваются содержания золота, теллура, серебра, что, вероятно, указывает на контактово-метаморфическую ремобилизацию этих элементов и их вхождение в перекристаллизованный или новообразованный пирит.

Сфалерит — главный концентратор кадмия (1362–1791 ppm), индия (33–113 ppm), ртути, которые, вероятнее всего, являются в нем изоморфными примесями. Высокие значения олова, по-видимому, связаны с микронными выделениями касситерита в сфалерите. Максимумы галлия также отмечаются

в сфалерите из участков контакта руд с дайкой и вмещающими породами.

Халькопирит — второй по значению концентратор кадмия и индия после сфалерита. В халькопирите близ контакта с дайкой содержания серебра заметно увеличиваются — в среднем до 29 ppm. Природа такого «облагораживания» халькопирита по всей видимости аналогична таковому пирита.

Список литературы

Варламов Д. А., Мурзин В. В., Шахтиярова А. В. Образование собственных минералов ультрарассеянных элементов в рудных месторождениях Урала // Уральская минералогическая школа. 2021. №27. С. 27–30. eLIBRARY ID: 46670799.

Викентьев И. В., Абрамова В. Д., Иванова Ю. Н., Тюкова Е. Э., Ковальчук Е. В., Бортников Н. С. Микропримеси в пирите золото-порфирового месторождения Петропавловское (Полярный Урал) по данным LA-ICP-MS // Докл. РАН. 2016. Т. 470. №3. С. 326–330. DOI: 10.7868/S0869565216270220.

Викентьев И. В., Спирина А. В. Геохимическая зональность рудной залежи Ново-Учалинского колчеданного месторождения (Южный Урал, Россия) // Вестник геонаук. 2022. №11 (335). С. 11–19. DOI: 10.19110/geov. 2022.11.2.

Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 г.». М.: Роснедра, 2021. 572 с.

Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 г.». М.: Роснедра, 2023. 640 с.

Знаменский С. Е., Серавкин И. Б., Чадченко А. В. Структура Учалинского месторождения: Препринт. Уфа: БНЦ УрО АН СССР, 1990. 21с.

Маслов В. А., Артюшкова О. В. Стратиграфия палеозойских образований Учалинского района Башкирии. Уфа: ИГ УфНЦ РАН, 2000. 140 с.

Орлов М. П., Чадченко А. В., Пирожок П. И., Кулбаков А. М. Новые рудные объекты в минерально-сырьевой базе ОАО «Учалинский ГОК» // Металлогения древних и современных океанов. 2009. №1. С. 337–338.

Пирожок П. И. Текстурные особенности и зональность рудной залежи Ново-Учалинского медно-цинково-колчеданного месторождения (Южный Урал) // Металлогения древних и современных океанов. 2008. №1. С. 90–94.

Пирожок П. И., Чадченко А. В., Орлов М. П., Моисеев И. Б., Кулбаков А. М. Доразведка и эксплуатационная разведка колчеданных месторождений: методика и результаты // Недропользование-XXI век. 2009. №3. С. 15–22.

Пшеничный Г. Н., Волькинштейн М. Я., Николайченков Ю. С. Ново-Учалинское медно-цинковоколчеданное месторождение Южного Урала. Уфа: УНЦ РАН, 1999. 420 с.

Пшеничный Г. Н., Рыкус Н. Г. Блеклые руды Учалинского и Ново-Учалинского медно-цинковоколчеданных месторождений (Южный Урал). Уфа: ИГ УНЦ РАН. 2001. 75 с.

Рыкус Н. Г. Минералого-геохимические особенности руд Учалинского и Ново-Учалинского месторождений на примере мышьяка и сурьмы (Южный Урал): Дис. … канд. геол.-минерал. наук. Уфа: УфНЦ ИГ РАН, 1999. 207 с.

Серавкин И. Б. Корреляция состава руд и рудовмещающих пород в вулканогенных колчеданных месторождениях (на примере Южного Урала) // Геология руд. месторождений. 2013. Т. 55. №3. С. 238–258. DOI: 10.7868/S0016777013030052

Серавкин И. Б., Косарев А. М., Салихов Д. Н., Знаменский С. Е., Родичева З. И., Рыкус М. В., Сначев В. И. Вулканизм Южного Урала. М.: Наука, 1992. 197 с.

Серавкин И. Б., Пирожок П. И., Скуратов В. Н. Минеральные ресурсы Учалинского горно-обогатительного комбината. Уфа: Башкирское книжное изд-во, 1994. 328 с.

Спирина А. В., Викентьев И. В., Варламов Д. А. Формы нахождения стратегических металлов в рудах Ново-Учалинского колчеданного месторождения (Южный Урал) // Новые идеи в науках о Земле. Мат. XVI межд. науч.-практ. конф. М.: МГРИ, 2023. С. 102–105.

Спирина А. В., Макаров В. В., Моисеев И. Б., Викентьев И. В. Детализация морфологии рудной залежи Ново-Учалинского колчеданного месторождения (Южный Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. 2020. №2. С. 35–46. DOI: 10.32454/0016-7762-2020-63-2-35-46

Ballhaus C., Bockrath C., Wohlgemuth-Ueberwasser C., Laurenz V., Berndt J. Fractionation of the noble metals by physical processes // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2006. V. 152. № 6. P. 667–684.

Bortnikov N. S., Vikentyev I. V. Endogenous metallogeny of the Urals. In: Mineral deposit research for a high-tech world; Jonsson E., Ed.; Uppsala, 2013. P. 1508–1511.

Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J., Hergt J. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2011. V. 26 (12). P. 2508–2518.

Vikentyev I., Vikent'eva O., Tyukova E., Nikolsky M., Ivanova J., Sidorova N., Tonkacheev D., Abramova V., Blokov V., Spirina A., Borisova D., Palyanova G. Noble metal speciations in sulphides // Minerals. 2021. V. 11. № 5. P. 488. DOI: 10.3390/min11050488

Wilson S. A., Ridley W. I., Koenig A. E. Development of sulfide calibration standards for the laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry technique // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2002. V. 17. P. 406–409.

References

Varlamov D. A., Murzin V. V., Shakhtiyarova A. V. (2021) Obrazovaniie sobstvennykh mineralov ultraraseyanykh elementov v rydnykh mestorozhdeniyakh Urala [Formation of own minerals of ultra-dispersed elements in ore deposits of the Urals]. Uralskaya mineralogicheskaya shkola. 27, 27–30. (In Russian).

Vikentiev I.V., Abramova V.D., Ivanova Y.N., Tyukova E.E., Kovalchuk E.V., Bortnikov N.S. (2016) Trace elements in pyrite from the Petropavlovsk gold — porphyry deposit (Polar Urals): results of LA-ICP-MS analysis. *Doklady Earth Sciences*. 470 (1), 977–981.

Vikentyev I.V., Spirina A.V. (2022) Geokhemicheskaya zonalnost rydnoi zalezhi Novo-Uchalinskogo kolchedanogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Ural, Rossiya) [Geochemical zonality of ore lode of Novo-Uchaly VMS deposit (South Urals, Russia)]. *Vestnik Geonauk*. 11 (335), 11–19. (In Russian).

Gosudarstvenyi doklad "O sostoyanii I ispolzovanii mineralno-cyryevykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2020 g. [State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2020"] (2021). *Rosnedra*. Moscow, 572 p. (In Russian).

Gosudarstvenyi doklad "O sostoyanii I ispolzovanii mineralno-cyryevykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2022 g [State report "On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2022"] (2023). *Rosnedra*. Moscow, 640 p. (In Russian).

Znamenskii S.E., Seravkin I.B., Chadchenko A.V. (1990). Sruktura Uchalinskogo mestorozhdeniya [Structure of the Uchaly deposit]. *Preprint. Ufa: BSC Ural Branch of the USSR Academy of Sciences*, 21p. (In Russian).

Maslov V.A., Artyushkova O.V. (2000) Stratigrafiya paleozoiskikh obrazovanii Uchalinskogo raiona Bashkirii [Stratigraphy of the Paleozoic Formations in the Uchaly District of Bashkiria]. *IG Ufa Scientific Center RAS*. Ufa, 140 p. (In Russian).

Orlov M.P., Chadchenko A.V., Pirozhok P.I., Kulbakov A.M. (2009) Novye obekty v mineralno-syhtvoi baze OAO "Uchalinskii GOK" [New ore objects in the mineral resource base of OJSC Uchalinsky]. *Metallogeniia drevnikh i sovremennykh okeanov* (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans), 1, 337–338 (In Russian).

Pirozhok P.I. (2008) Teksturnye osobenosti i zonalnost rudnoi zalezhi Novo-Uchalinskogo medno-tsinkovogo-kolchedanogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Ural) [Textural features and zoning of the ore lode of the Novo-Uchaly copper-zinc-pyrite deposit (Southern Urals)]. *Metallogeniia drevnikh i sovremennykh okeanov* (Metallogeny of Ancient and Modern Oceans), 1, 90–94. (In Russian).

Pirozhok P.I., Chadchenko A.V., Orlov M.P., Moiseev I.B., Kulbakov A.M. (2009) Dorazvedka I tkspluatatsionaya razvedka kolchedanykh mestorozhdenii: metodika I rezultaty [Additional exploration and operational exploration of volcanogenic massive sulfide deposits: methodology and results]. *Nedropolsovanyey — XXI vek* (Subsoil Use-XXI Century). (3), 15–22 (In Russian).

Pshenichny G.N., Volkinstein M.Ya., Nikolaichenkov Yu.S., Rykus N.G., Iskhakov M.A., Panova N.V., Gubanov L.I., Mironov V.V., Rogozhnikov A.K., Staheev I.P., Khramova O.G., Tsepin A.I. (1999) Novo-Uchalinskoe medno-tsinkovogokolchedanoe mestorozhdenie Yuzhnogo Urala [Novo-Uchaly copper-zinc-pyritic deposit of the Southern Urals]. *Nauka* (Science). Ufa, 395 p. (In Russian).

Pshenichny G.N., Rykus N.G. (2001) Bleklye rudy Uchalinskogo i Novo-Uchalinskogo medno-tsinkovogo-kolchedanykh mestorozhdenii (Yuzhnyi Ural) [Fahlores of the Uchaly and Novo-Uchaly copper-zinc pyrite deposits (Southern Urals)]. *IG UDC RAS*. Ufa, 76 p. (In Russian).

Rykus N.G. (1999) Mineralogo-geokhimicheskie osobenosti rud Uchalinskogo i Novo-Uchalinskogo medno-tsinkovogo-kolchedanykh mestorozhdenii na primere myshyaka I surmy (Yuzhnyi Ural) [Mineralogical and geochemical features of ores of the Uchaly and Novo-Uchaly deposits using arsenic and antimony as an example (Southern Urals)]. Phd Dissertation, *UfNC IG RAS*. Ufa, 207 p. (In Russian).

Seravkin I.B. (2013) Correlation between compositions of ore and host rocks in volcanogenic massive sulfide deposits of the Southern Urals. *Geology of ore deposits*. 55 (3), 207–224.

Seravkin I.B., Kosarev A.M., Salikhov D.N. et. al. (1992) Vulkanizm Yuzhnogo Urala [Volcanism of the Southern Urals]. *Nauka* (Science). Moscow, 197 p. (In Russian).

Seravkin I.B., Pirozhok P.I., Skuratov V.N., et. al. (1994) Mineralnye resursy Uchalinskogo gorno-obogatitelnogo kombinata [Mineral resources of the Uchaly ore mining and processing enterprise]. *Bashkir Book Publishing House*. Ufa, 328 p. (In Russian).

Spirina A.V., Vikentyev I.V., Varlamov D.A. (2023) Formy nakhozhdeniya strategicheskikh metallov v rudakh Novo-Uchalinskogo kolchedanogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Ural) [Forms of occurrence of strategic metals in ores of the Novo-Uchaly VMS deposit (Southern Urals)]. *Novye ideii v naukakh o Zemle* (New ideas in Earth sciences). XVI int. scientific-practical conf. MGRI. Moscow, 102–105. (In Russian).

Spirina A.V., Makarov V.V., Moiseev I.B., Vikentyev I.V. (2020) Detalizatsiya morfologii rudnoi zalezhi Novo-Uchalinskogo kolchedanogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Ural) [Morphological features of ore reserves of the Novo-Uchaly VMS deposit (Southern Urals)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii* (Proc. Higher Educational Establishments. Geology and Exploration). (2), 35–46 (In Russian).

Ballhaus C., Bockrath C., Wohlgemuth-Ueberwasser C., Laurenz V., Berndt J. (2006) Fractionation of the noble metals by physical processes. Contributions to Mineralogy and Petrology. V. 152. № 6. P. 667–684.

Bortnikov N.S., Vikentyev I.V. (2013) Endogenous metallogeny of the Urals. In: Mineral deposit research for a high-tech world; Jonsson E., Ed.; Uppsala. P. 1508–1511.

Paton C., Hellstrom J., Paul B., Woodhead J., Hergt J. (2011) Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. Journal of Analytical Atomic Spectrometry. V. 26 (12). P. 2508–2518.

Vikentyev I., Vikent'eva O., Tyukova E., Nikolsky M., Ivanova J., Sidorova N., Tonkacheev D., Abramova V., Blokov V., Spirina A., Borisova D., Palyanova G. (2021) Noble metal speciations in sulphides. Minerals. V. 488. № 11 (5). P. 1–69 DOI: 10.3390/min11050488.

Wilson S.A., Ridley W.I., Koenig A.E. Development of sulfide calibration standards for the laser ablation inductively-coupled plasma mass spectrometry technique // Journal of Analytical Atomic Spectrometry. 2002. V. 17. P. 406–409.

Сведения об авторах:

Викентьев Илья Владимирович, докт. геол.-мин. наук. Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), г. Москва. ORCID: 0000-0003-4567-0758, viken@igem.ru

Спирина Аделина Владимировна, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук. г. Москва, ORCID: 0000-0003-1365-5148, adelina.spirina@bk.ru

Тюкова Евгения Эрастовна, канд. геол.-мин. наук. Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН). Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИЦ РАН), г. Москва. ORCID: 0000-0002-8963-3263, evgtyuk@mail.ru

About the authors:

Vikentyev Ilya Vladimirovich, Doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, viken@igem.ru

Spirina Adelina Vladimirovna, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, adelina.spirina@bk.ru

Tyukova Evgeniya Erastovna, PHD of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), and Scientific Geoinformation Center, Russian Academy of Sciences (SGIC RAS). Moscow, evgtyuk@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.02.2025; одобрена после рецензирования 12.02.2025; принята к публикации 03.03.2025.

The article was submitted 10.02.2025; approved after reviewing 12.02.2025; accepted for publication 03.03.2025.